

# 基于组网技术的防空雷达探测系统仿真与评估

魏 磊, 吉国力, 陈文奇

(厦门大学自动化系, 福建 厦门 361005)

**摘要:** 防空雷达探测系统主要用于搜索、发现、识别和跟踪远方空中来袭的目标, 为防空作战系统提供必要的目标参数和预警。本文主要阐述了基于组网技术的现代防空雷达探测系统的概念模型, 并利用 Bayes 理论对该模型进行了分析、推导, 得出了某防空雷达组网探测系统的最大后验概率比判决模型; 最后, 对该系统的整体性能进行了仿真评估。

**关键词:** 雷达组网; 防空侦察系统; 判决模型; 仿真

**中图分类号:** TN 955.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0438-0479(2005) Sup-0277-04

防空雷达探测系统主要用于搜索、发现、识别和跟踪远方空中来袭的目标, 为防空作战系统提供必要的目标参数和预警。在现代高技术条件下, 由于空袭武器装备具有射程远、命中精度高、软硬杀伤能力强等特点, 因此防空雷达探测系统能否及时、准确地获取敌空袭信息和空袭系统电子技术情报等显得至关重要。而当今, 电子干扰、反辐射导弹、隐身技术和低空突防已严重威胁着单站雷达的生存。在过去, 为解决现代雷达面临的“四大威胁”问题, 人们多从单部雷达研究雷达的“四抗”(抗电子干扰, 抗反辐射导弹, 反隐身, 反低空突防)性能, 比如在雷达中加装各种对抗措施、采取更有效的信息处理和数据处理方法等。显然, 这是十分必要的, 但若把单站雷达组网作为一个整体, 所表现出来的优良性能则是单部雷达所无法比拟的, 其优越性主要表现在:

(i) 从具体战场背景状况出发实现多种雷达分布式的组网运用, 可以大大扩大系统时域、频域、空域的覆盖能力;

(ii) 同一系统中同时配备了各种不同类型、不同功能的雷达, 可以取长补短, 同时发挥各雷达的优越性, 实现信息共享, 有效提高发现目标的速度, 降低虚警、漏警和模糊的不确定性;

(iii) 各种雷达组网综合运用, 既可大大提高雷达网在恶劣电子战环境下的“四抗”能力, 又可更充分发挥各雷达的探测效益;

(iv) 雷达网既采取分散布署, 又采用冗余、容错设计, 可以大大提高系统的生存能力;

(v) 采用系统工程原理对雷达网进行一体化系统

设计, 可以充分发挥有限国防资源、资金利用率, 降低成本, 提高费效比。

雷达组网技术不仅可应用于军事领域, 其它民用领域如航空、气象预报等部门也可广泛使用。正是由于雷达组网能够带来巨大的军事、经济效益, 因而该技术已引起世界各国的高度重视, 并得到了迅速发展。目前, 有关雷达组网研究方面的文章也不少, 但涉及实质问题的文章并不是很多<sup>[1]</sup>。本文则主要阐述了基于组网技术的现代防空雷达探测系统的概念模型, 并利用 Bayes 理论对该模型进行了分析、推导, 得出了某防空雷达组网探测系统的最大后验概率比判决模型, 最后对该系统的整体性能进行了仿真和评估, 得出了系统优化的结论。

## 1 雷达组网技术

基于雷达组网技术的现代地面对空侦察探测系统就是应用两部或两部以上空间位置互相分离且覆盖范围互相重叠的雷达的观测或判断来实施搜索、跟踪和识别空中目标的系统。系统主要包括: (i) 战略预警雷达, 它主要用于搜索弹道导弹和战略轰炸机, 作用距离在 400 km 以上<sup>[2]</sup>; (ii) 警戒引导雷达, 用于较远距离上发现来袭飞机或导弹, 作用距离一般在 300 ~ 600 km; (iii) 制导(火控)雷达, 用于发现和自动跟踪空中目标, 连续测定目标坐标, 以保障地空导弹、高炮射击目标; (iv) 电子情报基站等其它对空侦察、监视装备, 如夜视仪、光学侦察器材等, 主要用于侦察低空近程目标。 (v) 数据融合中心, 用于完成目标检测、定位跟踪及属性分类等。其组成原理示意图如图 1。

雷达组网是多传感器数据融合技术的一个重要应用场合。图 2 为雷达组网系统数据融合处理示意图。

收稿日期: 2005-03-11

作者简介: 魏磊(1973 - ), 男, 硕士研究生。

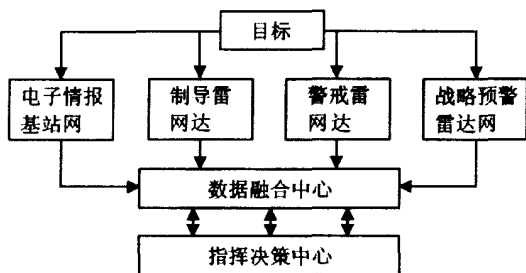


图1 基于雷达组网的地面防空探测系统组成原理图

Fig.1 The sketch plan of aerial defense detecting system

## 2 系统的判决模型

在当今防空作战中,提高作战指挥决策的效率,解捕捕获目标中假目标的判决问题是极其重要的。为便于系统模型的建立,现假定防空侦察预警系统中各雷达都能正常工作,相互间传输效率为1,且都能按各自战技术性能合理的配置于各自位置上,现将建模所需参数描述如下: 为目标所有航行轨道集合, 为主要方向上目标可能空袭的轨道, 令  $\Omega = \{\omega_i\}_{i=0}^L$ ,  $\omega_i = \{\omega_{ij}\}_{j=0}^L$ , 其中  $\omega_i, i > 0$  是重要方向上可能轨道,  $\omega_0$  由不属于任何  $\omega_i$  的假点构成,  $i = 1, 2, \dots, I$  为同一雷达的数量,  $\omega_0$  为同一类型雷达测量的假目标集合,  $\omega_i = \omega_j, i \neq j, i, j = 0, 1, 2, \dots, I$ ;  $\omega_i = \{Z_{i1}, \dots, Z_{iK}\}$ , 其中  $Z_{ij}$  ( $j = 1, \dots, K$ ) 为主要方向上第  $i$  个轨道的  $k$  批测量中的某一次测量。  $P(c_{d1})$  为战略预警雷达网中, 第  $d_1$  部战略预警雷达发现并截获目标的概率;  $P(c_{d2})$  为警戒雷达网中, 第  $d_2$  部警戒引导雷达发现并截获目标的概率;  $P(c_{d3})$  为近方电子情报站网中, 第  $d_3$  部传感器发现并截获目标的概率;  $P(c_{d4})$  为制导雷达网中, 第  $d_4$  部制导(火控)雷达发现并截获目标的概率;  $P(c_{d5})$  为数据融合处理中心能及时有效地将  $d_5$  次信息及时有效的传给决策中心的概率。

本次推导过程主要利用了最大后验概率准则和 Bayes 准则,相关知识,请参阅文献[3]。本文的判决模型的得出都是基于经典的 Bayes 推理方法,其基本建模步骤是:第一步,构造出目标可能飞行的轨道集合;第二步,对目标可能飞行轨道进行分类:  $H_0$ : 中所有测量皆为虚假测量(杂波或干扰等),此时 中所包含的  $I$  批目标皆为假目标;  $H_1$ : 是按正常测量的可行分划,假点只集中于  $\omega_0$  中,并设第  $k$  周期目标发现概率为  $P_{Dk}$ ,各周期虚警(假点发现) 概率为  $P_F$ ;第三步,利用 Bayes 准则列出最大似然估计函数;第四步,利用判决准则,画出判决框图;简而言之,就是:

- (i) 列出目标所有可能轨道集合  $\Omega = \{\omega_i\}_{i=0}^L$ ;
- (ii) 计算先验概率  $P(H_0)$  和  $P(H_1)$ ;

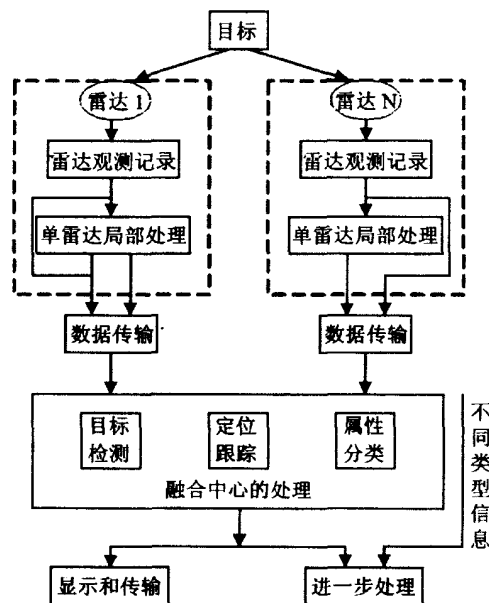


图2 雷达组网系统数据融合处理示意图

Fig.2 The sketch plan of data fusion in radar neting

(iii) 计算后验概率比;

(iv) 形成判决准则,画出判决框图;

现设可行性划分  $\Omega = \{\omega_i\}_{i=0}^L$ , 满足  $\omega_i \cap \omega_j = \emptyset, i \neq j, i, j = 1, 2, \dots, I$ . 第  $k$  批目标  $H_0$  的先验概率实际上为对  $I$  批目标皆丢失的概率与  $m_k$  个测量皆为虚警的概率之和。设每类雷达中有  $j$  部雷达,每部雷达的截获概率都为  $P_{Dk}$ ,则每一类雷达在  $I$  批测量中丢失目标概率为  $(1 - P_{Dk})^{jI}$ ,每一类雷达  $m_k$  个测量皆为虚警的概率为  $P_F^{m_k}$ ,从而第  $k$  批目标  $H_0$  的发现概率为:

$$P(H_0) = \sum_{z=1}^5 \sum_{k=1}^K P_F^{m_k} (1 - P_{D_z k})^{jI} \quad (1)$$

其中  $P_{D_z}$  为侦察系统中第  $z$  类雷达目标截获概率。

在  $H_1$  假设下, 是正常测量的可行分划,此时  $H_0$  中含有虚假测量数为:

$$n = m - \sum_{i=1}^I n_{ki} = m - n \quad (2)$$

这里  $m = m_1 + m_2 + \dots + m_K$  为对  $K$  批目标总的测量数目,  $n = n_{k1} + n_{k2} + \dots + n_{ki}$  为可行分划 中对  $I$  批目标总的测量数目,而

$$R_D = \begin{cases} 1 & d_i \geq K, \quad \text{目标存在} \\ 0 & d_i < K, \quad \text{目标不存在} \end{cases}$$

为可行分划 中  $I$  批目标的有效测量之和,则

$$P(H_1) = \sum_{z=1}^5 \sum_{i=1}^I P_F^{jI} P_{D_z}^{n_{ki}} (1 - P_{D_z})^{(K - n_{ki})j} \quad (3)$$

其中  $P_{D_z}^{n_{ki}}$  为第  $z$  类雷达的第  $i$  批目标(所含  $n_{ki}$  个测量)

的发现概率. 由于  $K$  为每批目标所含的最多测量数 (可能轨道每周最多选一个测量), 因此  $k - n_{li}$  为第  $i$  批目标所丢失 (未发现) 的测量数, 又由于每类雷达中含有  $j$  部雷达, 故  $(1 - P_{D_z})^{(k - n_{li})j}$  为第  $z$  类雷达第  $i$  批目标丢失概率, 又由  $H_0, H_1$  事先的初始定义:

$$P(Z/H_1) = \prod_{z=1}^5 \left\{ \prod_{i=1}^I [P_z(l_i) P_z(l_0)]^j \right\} \quad (4)$$

$$P(Z/H_0) = \prod_{z=1}^5 [P_z(l_0)]^j \quad (5)$$

所以后验概率比为:

$$\frac{P(H_1/Z)}{P(H_0/Z)} = \frac{P(H_1) P(Z/H_1)}{P(H_0) P(Z/H_0)} = \frac{\prod_{z=1}^5 \left\{ \prod_{i=1}^I [P_z(l_i) P_z(l_0)]^j \right\}}{\prod_{z=1}^5 [P_z(l_0)]^j} \quad (6)$$

又因为

$$\begin{aligned} \frac{P(H_1)}{P(H_0)} &= \frac{\prod_{z=1}^5 \prod_{i=1}^I [P_{D_z}^{j n_{li}} (1 - P_{D_z})^{(k - n_{li})j}]}{\prod_{z=1}^5 \prod_{k=1}^K P_{D_z}^{j m_k} (1 - P_{D_z})^{j l}} = \\ &= \prod_{z=1}^5 \frac{\left\{ \prod_{i=1}^{j(m-n)} [P_{D_z}^{j n_{li}} (1 - P_{D_z})^{(k - n_{li})j}] \right\}}{(1 - P_{D_z})^{j l K} P_{D_z}^{j m_k}} = \\ &= \prod_{z=1}^5 \left[ \frac{P_{D_z}}{P_F (1 - P_{D_z})} \right]^{j n} \end{aligned} \quad (7)$$

将式(4)、(5)、(7)代入式(6), 得

$$\frac{P(H_1/Z)}{P(H_0/Z)} = \prod_{z=1}^5 \prod_{i=1}^I \left[ P_z(l_i) \right]^j \prod_{z=1}^5 \left[ \frac{P_{D_z}}{P_F (1 - P_{D_z})} \right]^{j n} \quad (8)$$

由于  $P_z(l_i)$  是指第  $z$  类雷达, 在主要方向上第  $i$  个飞行轨道  $k$  个周期的截获概率, 因此有:

$$P_z(l_i) = \prod_{i=1}^I \prod_{k=1}^K [P_z(Z_{ki})]^{ik} \quad (9)$$

$$ik = \begin{cases} 0, & \text{第 } k \text{ 周期丢失目标} \\ 1, & \text{其它} \end{cases} \quad (10)$$

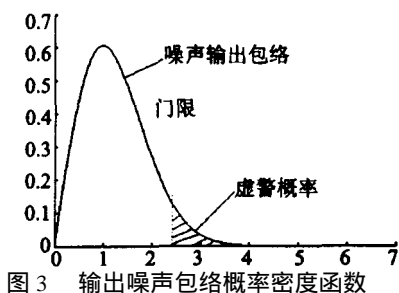


图3 输出噪声包络概率密度函数

Fig. 3 The probability density function of  $r$

将式(9)、(10)代入(8), 得

$$\frac{P(H_1/Z)}{P(H_0/Z)} = \prod_{z=1}^5 \left[ \frac{P_{D_z}}{P_F (1 - P_{D_z})} \right]^{j n} \prod_{i=1}^I \prod_{k=1}^K [P_z(Z_{ki})]^{ik} \quad (11)$$

这就是所要获得的假目标判定后验概率比公式.

### 3 仿真结果分析

从上面获得的后验概率比公式可以看出, 只要增大检测概率  $P_{DZ}$  或减小  $P_F$  (虚警概率), 都可以使判决比值更大, 从而系统性能更优. 而对单部雷达来说, 是用门限装置来判断噪声背景中是否有信号存在, 而这种门限装置的性能是用检测概率  $P_d$  和虚警概率  $P_f$  两个概率来表示:

$$P_f = \int_{V_T}^{\infty} \frac{r}{2} \exp\left(-\frac{r^2}{2}\right) dr = \exp\left(-\frac{V_T^2}{2}\right) \quad (12)$$

其中  $\sigma^2$  是中频滤波器噪声方差,  $V_T$  是门限电压,  $r$  是滤波器输出的噪声包络振幅. 整个检测过程我们可以用只有噪声和信号加噪声的概率密度函数来说明, 如图3、4所示.

从上图可看出, 噪声分布一定时, 虚警概率  $P_f$  取决于门限电平.  $V_T/2$  为包络检波器输出包络的概率密度函数, 从图中显然可以看出门限  $V_T/2$  提高时虚警概率降低, 但发现概率也会降低, 我们总是希望虚警概率一定时提高发现概率, 这只有提高信噪比才行. 又从  $S/N$ 、 $P_d$  和  $P_f$  之间的关系, 当虚警概率一定时, 信噪比越大则发现概率越大, 也就是说门限电平一定时, 发现概率随信噪比增大而增大. 换句话说, 如果信噪比一定, 则虚警概率越小 (门限电平越高) 发现概率越小; 虚警概率越大, 发现概率越大. 关于  $S/N$  对  $P_d$  和  $P_f$  的影响, 如表1所示.

实验数据表明, 要先选定合适的  $P_d$  和  $P_f$ , 从而使后验概率比值最大, 同时还需根据雷达的性能参数与战时的实际需要来确定, 选定合适的  $P_d$  和  $P_f$  使后验概率比值达到要求即可. 在现代, 通常使用多部雷达组

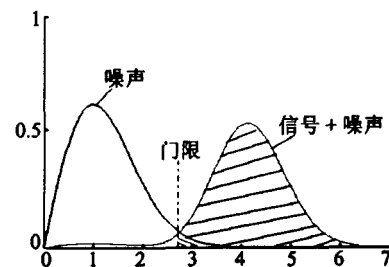


图4 用概率密度函数说明检测过程

Fig. 4 The illustration of detection

表 1 信噪比、虚警概率  $P_f$ 、发现概率  $P_d$  相互关系表Tab. 1 Interrelation of  $S/N$ ,  $P_f$ ,  $P_d$ 

$S/N$	$P_f$						
	$10^{-3}$	$10^{-4}$	$10^{-5}$	$10^{-6}$	$10^{-10}$	$10^{-11}$	$10^{-12}$
10	0.82	0.62	0.32				
12	0.985	0.925	0.82				
14		0.993	0.9965	0.985			
16					0.985	0.972	0.935

网来提高  $P_d$ , 减小  $P_f$ , 从而使系统性能优化, 限于篇幅, 本文只给出仿真结果, 具体叙述读者可参阅文献 [4], 下面仅给出结果: 当秩  $k=2$  (所谓秩  $k$  融合规则, 指假定有  $n$  个局部检测器, 其中至少有  $k(1 \leq k \leq n)$  个检测器判定目标存在, 则数据融合中心就确定目标存在),  $N=6$  ( $N$  为雷达数量) 时的雷达组网可以达到价格适中, 性能最优的效果。

## 4 结 论

由以上分析, 可以得出以下系统检测性能优化的结论:

- (i) 整个系统性能主要取决于系统内各类雷达的性能;
- (ii) 对  $k$  规则工作模式的选择是一个综合考虑与权衡的过程;
- (iii) 网内雷达数目的增加可以增强检测性能, 但

并非越多越好, 必须在性能和成本之间适当选择一个或多个“满意”方案, 当  $N > 6$  时, 检测性能的改善不明显。当单部雷达的发现概率在  $0.3 \sim 0.7$  之间时, 雷达网的发现概率改善比较大。

(iv)  $P_f$  与  $P_d$  的选择要依据战时需要和系统性能来综合评定。

## 参考文献:

- [1] 邵锡军. 预警探测系统雷达组网技术研究[J]. 现代雷达, 2003, 25(9): 1-4.
- [2] 王凤山, 王福田. 防空信息战概论[M]. 北京: 航空工业出版社, 2002.
- [3] 刘福声, 罗鹏飞. 统计信号处理[M]. 湖南: 国防科技大学出版社, 1999.
- [4] 王国玉, 汪连栋, 王国良, 等. 雷达电子战系统数学仿真与评估[M]. 湖南: 国防工业出版社, 2004.

# Simulation and Evaluation of Aerial Defense Detecting System Based on Radar Netting Technique

WEI Lei, JI Guo-li, CHEN Wen-qi

(Dept. of Automation, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

**Abstract:** Aerial defense radar detecting system is used to search, discover, identify and scout the aerial target, it can provide necessary information and alarm for aerial defense system. A modern conceptual model of aerial defense detecting system which based on radar netting technique was expatiated. Through analyzing it with Bayes Theory, the maximum probability judicative model of the system was given. The whole capability of this system was simulated and evaluated by combining some related experiment data.

**Key words:** radar netting; aerial defense detecting system; judicative model; simulation